

✓ 2011 3 1200 14

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

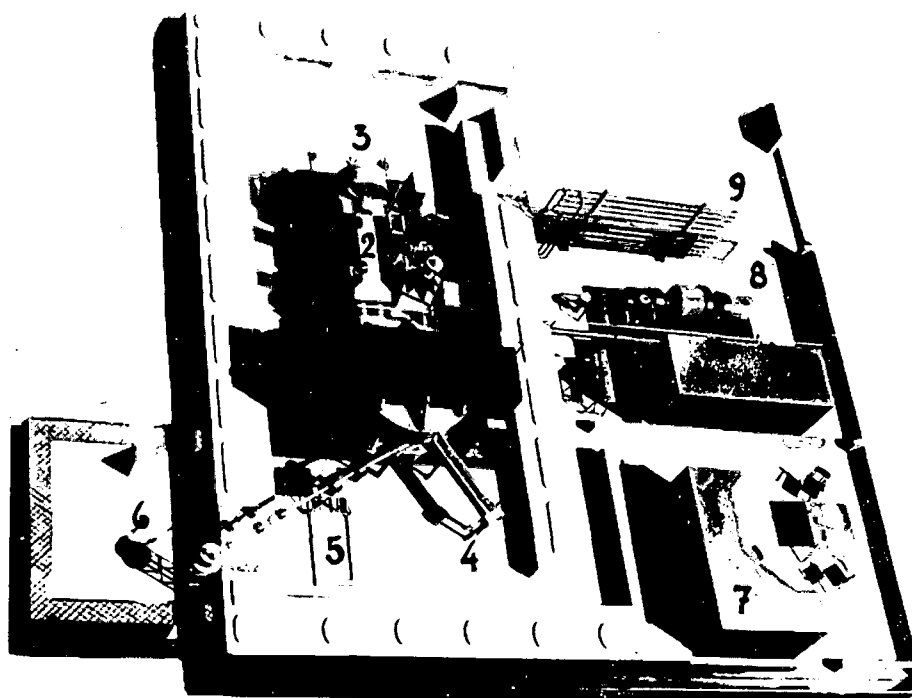
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

EL SINCROCICLOTRON DE BUENOS AIRES

SANTOS MAYO

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

REPUBLICA ARGENTINA
1967



MODELO DEL SINCRICICLOTRON DE BUENOS AIRES

- 1) Cuerpo del electroimán del Sincrociclotrón productor del campo magnético $\vec{H}$.
- 2) Línea de media onda para 11 MHz.
- 3) Tanque de vacío que contiene al modulador de frecuencia del campo eléctrico $\vec{E}$.
- 4) Caño de la fuente de iones en su soporte.
- 5) Cañería al vacío para conducción del haz externo provista de lentes cuadrupolares de enfoque.
- 6) Cámara de reacciones nucleares.
- 7) Tablero de control.
- 8) Grupo motor generador para activar el electroimán.
- 9) Intercambiador del calor generado en las bobinas del electroimán.

ERRATA

pág. 11, 1er. renglón, donde dice "KW", debe decir "kW".

pág. 14. 3er. renglón, donde dice "KV", debe decir "kV".

La presente descripción del sincrociclotrón de Buenos Aires está encarada como un trabajo de divulgación científica destinado a quienes desean conocer en forma descriptiva el funcionamiento de uno de los instrumentos más importantes de la Física Nuclear.

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
CENTRO DE INFORMACION CAC

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

EL SINCROCICLOTRON DE BUENOS AIRES

SANTOS MAYO

REPUBLICA ARGENTINA
1967

1. Introducción

En 1952 la CNEA adquirió a la Compañía Philips de Holanda un sincrociclotrón capaz de acelerar deuterones y partículas alfa a energías nominales de 30 y 60 MeV respectivamente. Durante 1954 dicho acelerador fue instalado en Buenos Aires comenzando sus irradiaciones el 4 de Noviembre de ese año.

Desde entonces se han realizado experiencias en los campos de la Física, Química y Biología Nucleares cuyos resultados hasta el presente han sido dados a conocer por sus autores en más de 170 publicaciones y comunicaciones a congresos científicos del país y del extranjero. Alrededor de 50 investigadores argentinos y 14 extranjeros que han visitado el país han utilizado sus facilidades para las investigaciones desarrolladas habiendo además realizado prácticas de investigación numerosos estudiantes universitarios de carreras afines.

El laboratorio del sincrociclotrón opera permanentemente con un personal estable de 20 científicos y técnicos realizando tareas de desarrollo y mantenimiento en cumplimiento de planes científicos de CNEA.

2.- Principio de Funcionamiento del Sincrociclotrón

Recordaremos en primer término algunas ideas básicas que nos permitirán entender mejor el funcionamiento de este acelerador.

En este caso la sustancia acelerada está constituida por los núcleos de los átomos de deuterio o de helio según el caso.

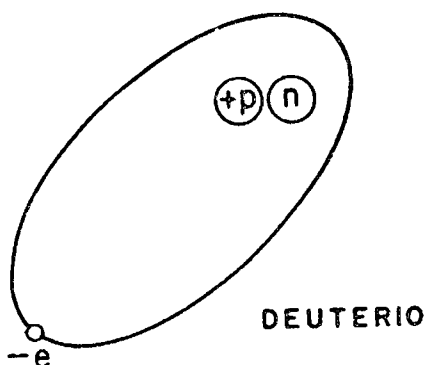
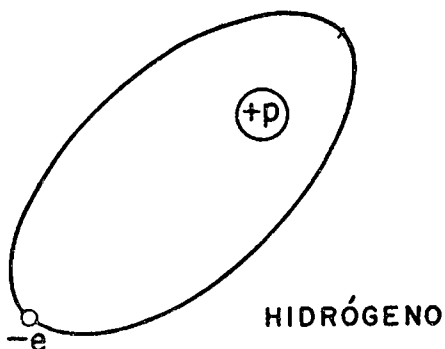
Para fijar ideas analizaremos el primer caso solamente.

Como es bien sabido el elemento natural más simple es el hidrógeno; bien conocido en sus propiedades químicas, sabemos que

está constituido por un núcleo cargado eléctricamente con carga de signo positivo y un electrón cargado eléctricamente con carga de signo negativo.

Ambas partículas, protón y electrón están ligadas entre sí formando una estructura en equilibrio dinámico que constituye un átomo eléctricamente neutro. Dentro de la familia de átomos de hidrógeno existen en forma natural al-

gunos átomos que se comportan químicamente igual pero que difieren en su masa; por ejemplo existe un hidrógeno más pesado que el común (aproximadamente posee masa doble por tener además de un protón, un neutrón ligado a su núcleo) llamado deuterio. Este no es un elemento distinto ya que posee las mismas propiedades químicas que el hidrógeno y ocupa el mismo lugar dentro de la clasificación o tabla periódica de los elementos naturales que realizara Mendelejew en el siglo XIX. Puesto que el deuterio, cuya abundancia en la naturaleza es de sólo 0,0156 % con respecto al hidrógeno ocupa el mismo lugar en la tabla periódica se lo denomina justamente isótopo del hidrógeno (del griego: iso = igual topos = lugar). Existe además otro isótopo del hidrógeno llamado tritio y se conocen



actualmente isótopos de todos los elementos naturales al punto que ya no se piensa en un elemento sino en la familia de isótopos de ca da elemento existiendo familias con hasta 27 componentes o miembros.

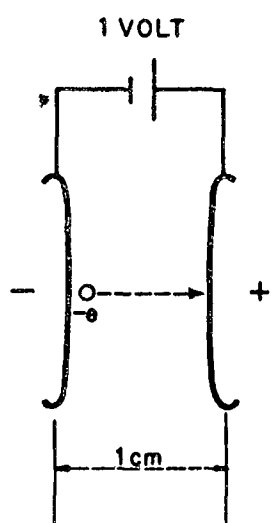
Los núcleos atómicos están constituidos por protones y neutrones; si a un núcleo dado cuyo número de protones y neutrones está determinado se le añade por métodos apropiados un neutrón se formará un isótopo de aquel, miembro de la familia de ese elemento. Este proceso puede repetirse dentro de ciertos límites produciéndose núcleos con exceso de neutrones respecto de los isótopos naturales; cuando el exceso de neutrones alcanza ciertos valores ya no es posible generar nuevos isótopos por razones de equilibrio energético nuclear.

Para que una partícula pueda ser acelerada debe cumplir ciertas condiciones una de las cuales es poseer carga eléctrica; vale decir en el caso del deuterio debe extraérsele su único electrón quedando entonces como remanente el núcleo llamado deuterón formado por un protón y un neutrón unidos; dicho núcleo posee la carga eléctrica e de signo positivo que le confiere la presencia del protón ya que el neutrón no posee carga eléctrica alguna.

Una vez ionizado el deuterio es sometido a la acción de un campo eléctrico $\vec{E}$ que ejerce sobre él cierta fuerza $\vec{F} = e \vec{E}$. Como consecuencia de la acción de esta fuerza el deuterón comienza a moverse con movimiento uniformemente acelerado al igual que todo otro móvil sometido a la acción de una fuerza constante, y recorre un espacio $s = \frac{1}{2} at^2$ siendo a la aceleración o incremento de velocidad en la unidad de tiempo y t el tiempo durante el cual se ejerce la fuerza $\vec{F}$.

Recordemos aquí la definición de una unidad de energía práctica de uso frecuente en el estudio de aceleradores de partícu-

las. Si un electrón e se halla sometido a la acción de un campo eléc-



trico $\vec{E}$ de 1 Volt/cm (por ejemplo este campo puede crearse mediante un condensador eléctrico plano cuyas armaduras paralelas están separadas entre sí 1 cm y a las cuales se aplica una diferencia de potencial de 1 Volt) resulta que al recorrer 1 cm de camino s en la dirección de las líneas de fuerza del campo eléctrico adquiere una energía definida como 1 electrón-Volt:

$$\text{Energía} = \text{Trabajo} = \text{Fuerza} \times \text{Espacio Recorrido} = e\vec{E}s = 1,6 \times 10^{-20} \frac{g^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{1}{2}}}{\text{seg}^{-1}} \times 1 \text{ cm} =$$

$$= 1,6 \times 10^{-12} \text{ ergio} = 1 \text{ eV}$$

donde la carga del electrón e es $1,6 \times 10^{-20} g^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{1}{2}} \text{ seg}^{-1}$; 1 Volt/cm es $10^8 g^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{1}{2}} \text{ seg}^{-1} / \text{cm}$ correspondiente al sistema de unidades CGS electromagnético.

Un múltiplo de esta unidad es el mega electrón Volt, unidad usada preferentemente para el estudio de aceleradores como el que nos ocupa: $1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-6} \text{ ergio}$.

Si un ión de carga positiva e (como es el caso del deuterón) está sometido a un campo eléctrico establecido entre las armaduras de un condensador cuya diferencia de potencial es 30 millones de Volt adquiere al recorrer el espacio entre las armaduras una energía de 30 MeV.

Como es obvio, disponer de una diferencia de potencial semejante involucra problemas tecnológicos complejos por lo cual para salvar esta dificultad fue necesario idear un mecanismo que, utilizando pequeñas diferencias de potencial permitiera acelerar repetidas veces al mismo átomo ionizado hasta que alcance la energía deseada.

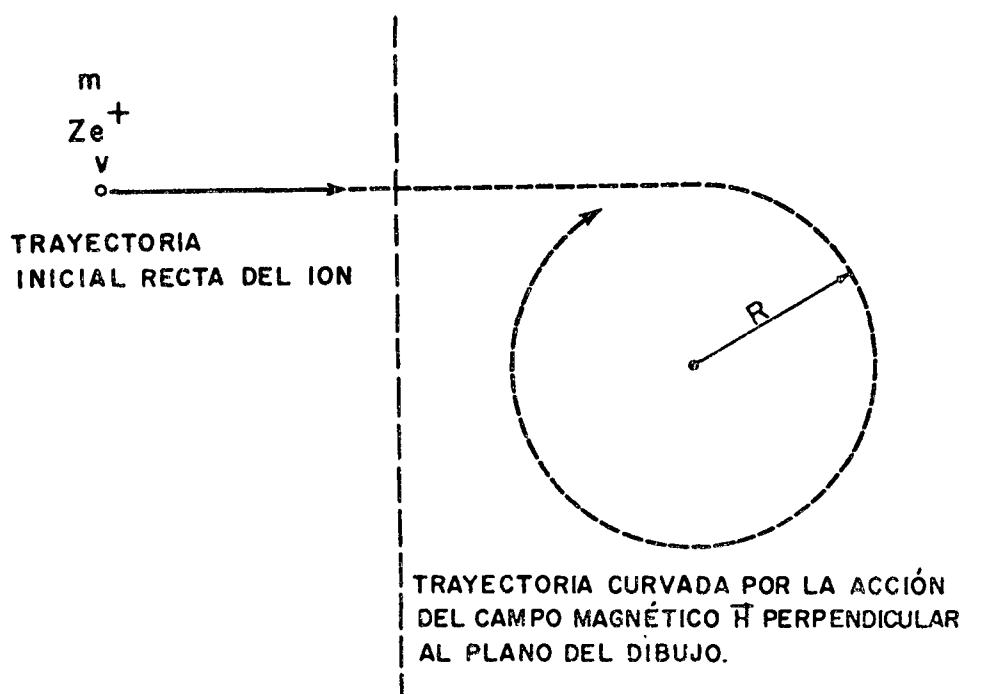
Como vimos antes, un electrón o un ión (átomo al que falta algún electrón) al ser colocado bajo la acción de un campo eléctrico $\vec{E}$ se mueve según la dirección de las líneas de fuerza de dicho campo. Por lo tanto el ión recorre la línea de fuerza partiendo de una armadura del condensador y llegando a la opuesta; esto implica necesariamente que el ión recibe del campo eléctrico toda su energía durante un solo recorrido lo cual nos obliga como vimos, a utilizar enormes diferencias de potencial para alcanzar energías de algunos MeV. Sería interesante, para nuestro propósito, conseguir que el mismo ión recorriera varias veces el mismo camino a lo largo de las líneas de fuerza del campo eléctrico del condensador para poder utilizar así varias veces la misma diferencia de potencial aplicada entre las armaduras, ya que la energía adquirida por el ión se acumula en los sucesivos recorridos.

Así por ejemplo, si logramos que, mediante un artificio, el mismo deuterón recorra 1.000 veces el espacio en el cual está establecido el campo eléctrico y deseamos una energía final de 30 MeV, solamente necesitaremos aplicar cada vez una diferencia de potencial de 30.000 volt, lo cual si bien es complejo se halla perfectamente dentro de los alcances de la técnica actual.

Por lo tanto el problema de acelerar iones según este esquema se reduce a encontrar métodos que permitan hacerles recorrer el mismo campo eléctrico muchas veces y una de las formas consiste en curvar la trayectoria de las partículas aceleradas en forma tal que recorran ciclos de aceleración acumulativa alcanzando la energía deseada. *

* En la actualidad se han encontrado diversas soluciones para este problema existiendo aceleradores de partículas que emplean campos eléctricos estáticos o variables de alta frecuencia. Nuestro propósito es aquí simplificar al máximo posible las explicaciones relativas al sincrociclotrón por lo cual no desarrollaremos otros temas relativos a aceleradores en general.

Para comprender mejor la solución encontrada en el caso del ciclotrón y del sincrociclotrón vamos a estudiar previamente el movimiento dentro de un campo magnético de una partícula de materia, eléctricamente cargada, animada de cierta velocidad. Supongamos que reemplazamos el espacio entre las armaduras del condensador eléctrico dentro del cual se movía el ión según las líneas de fuerza del campo $\vec{E}$ por el espacio entre polos de un electroimán orientado de modo que la partícula se mueva perpendicularmente a las líneas de fuerza del campo magnético $\vec{H}$. Qué le ocurre a la partícula en estas condiciones? Si el ión posee carga eléctrica e y está animado con un movimiento de velocidad $\vec{v}$, al atravesar el campo magnético $\vec{H}$ en una dirección perpendicular al mismo, el campo ejerce sobre la partícula una fuerza $\vec{F} = e\vec{v}\vec{H}$ perpendicular a $\vec{v}$ y $\vec{H}$. Por lo tanto la trayectoria del ión que inicialmente era recta comenzará a curvarse y esto es precisamente lo que deseamos para resolver nuestro problema.



Vemos así que combinando un campo eléctrico $\vec{E}$ y otro campo magnético $\vec{H}$ perpendiculares entre sí es posible acelerar un ión e imponerle una trayectoria curvilínea tal como resulta necesario a nuestro propósito. Pero surge ahora otra cuestión.

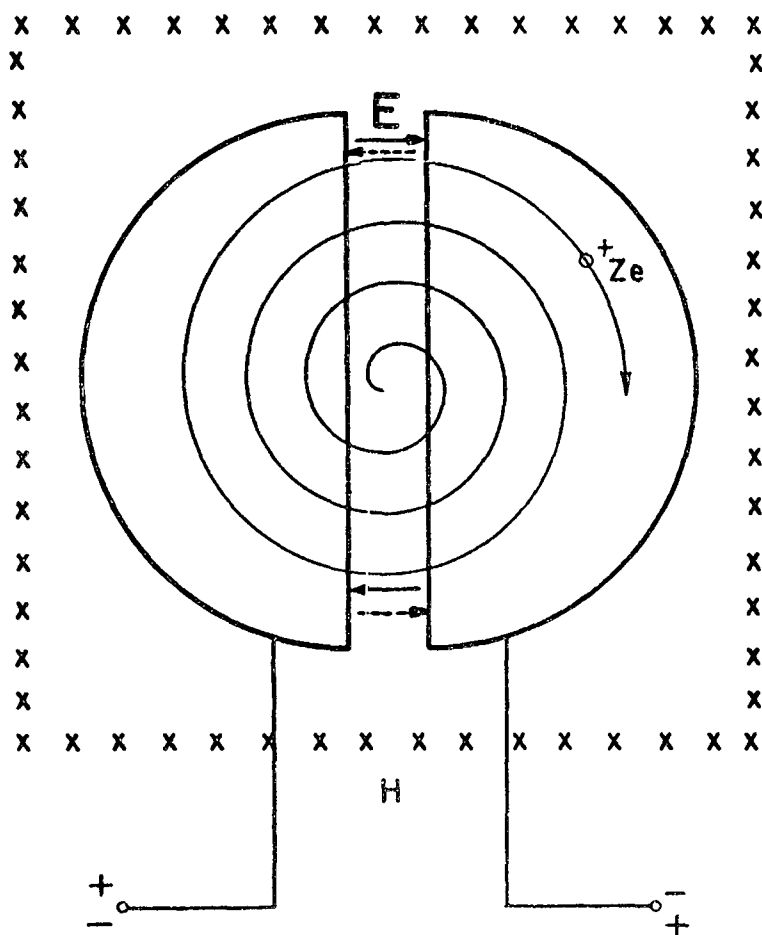
Si utilizamos un campo eléctrico estático el ión acelerado se desplazará en línea recta según la dirección de las líneas de fuerza del campo eléctrico $\vec{E}$. Debido a la presencia simultánea de un campo magnético $\vec{H}$ suficientemente intenso y perpendicular al anterior la trayectoria del ión sufrirá como vimos antes una curvatura tal que la dirección de desplazamiento del ión podría llegar a oponerse a la dirección del campo $\vec{E}$ y por lo tanto el ión comenzaría a frenarse o desacelerarse.

Por lo tanto para mantener el movimiento uniformemente acelerado del ión es necesario invertir el sentido del campo eléctrico $\vec{E}$ en sincronismo con el giro impuesto a la trayectoria por el campo $\vec{H}$.

Este fue precisamente el proceso seguido hasta la invención del ciclotrón en 1930 por el Profesor Ernesto O. Lawrence de la Universidad de California, USA.

Las armaduras del condensador tomaron la forma de la letra de imprenta D y el electroimán generador del campo $\vec{H}$ tiene piezas polares de forma cilíndrica tales que el ión acelerado recorre una trayectoria de forma espiral comenzando en el centro del acelerador con muy baja velocidad y ganando energía en cada cruce a lo largo de las líneas de fuerza del campo eléctrico $\vec{E}$.

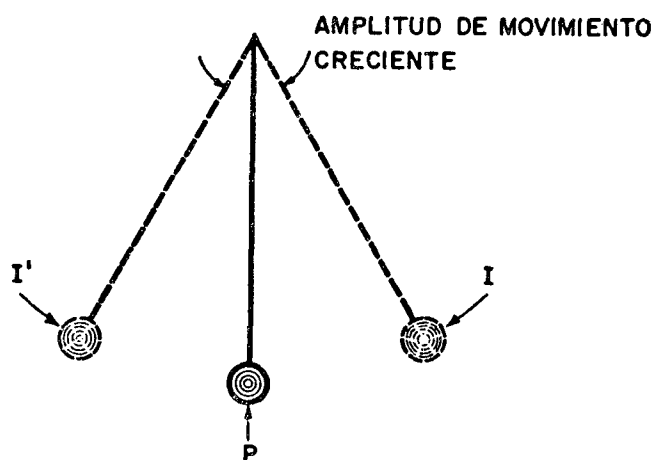
El movimiento del ión según la trayectoria espiral se cumple de modo que en cada momento existe equilibrio entre la fuerza que el campo magnético $\vec{H}$ ejerce sobre él y la fuerza centrífuga



que tiende a extraerlo de su órbita: $\frac{mv^2}{r} = evH$; en estas condiciones para que la ganancia de energía que el ión experimenta sea creciente es necesario que el campo eléctrico $\vec{E}$ invierta su sentido toda vez que el ión ejecuta un cruce por la zona de aceleración de modo que para el próximo cruce el campo $\vec{E}$ vuelva a acelerar al ión y no a retrasarlo.

Vale decir que el ión acelerado ejecuta un movimiento cíclico cuya amplitud es creciente siempre que se le aplique un impulso en el instante apropiado. Todo otro impulso fuera de tiempo retrasa su movimiento y podría llegar a frenarlo.

Como analogía puede pensarse en el movimiento de un péndulo al cual se le aplica un impulso en la dirección de caída hacia la posición de equilibrio precisamente cuando invierte el movimiento de la lenteja: entonces la amplitud de su movimiento oscilatorio crece constantemente; si en cambio se le aplicara un impulso en otro momento llegaría a frenarse.



P= POSICIÓN DE EQUILIBRIO

I, I'= IMPULSO APLICADO AL PÉNDULO CUANDO COMIENZA EL MOVIMIENTO DE CAÍDA HACIA LA POSICIÓN DE EQUILIBRIO.

Hasta aquí hemos explicado el funcionamiento del ciclotrón.

Cuál es la diferencia con el sincrociclotrón? Para contestar esta pregunta necesitamos recurrir a la Teoría de la Relatividad que describe el crecimiento de la masa de una partícula a medida que crece la velocidad de su movimiento.

Si $\vec{v}$ es la velocidad de la partícula y m_0 su masa cuando está en reposo resulta que la masa correspondiente cuando se mueve

a la velocidad $\vec{v}$ es $m = m_0 \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ siendo c la velocidad de la luz ($c = 3 \times 10^{10}$ cm/seg).

Por lo tanto si la partícula gana energía también su masa aumenta y por tanto se comporta como un péndulo más pesado que necesita más tiempo en ejecutar una oscilación;* lo cual implica que deberá aplicarse el impulso I en el momento preciso correspondiente al comienzo del movimiento de caída hacia la posición de equilibrio y no antes.

Pero al recibir este impulso I el péndulo vuelve a ganar energía y por tanto vuelve a aumentar su masa según la ley relativista mencionada de modo que el próximo impulso I' deberá aplicarse también algo más tarde que el instante en que terminaría de ejecutar su oscilación de no haber ganado la energía que le entregó el último impulso I .

Puesto que los impulsos I , I' son los que el campo eléctrico $\vec{E}$ aplica a las partículas resulta que la frecuencia con que el campo $\vec{E}$ cambia su sentido debe estar en sincronismo con el movimiento de los iones acelerados de modo tal que se adapte en todo momento a la frecuencia de revolución de los iones en su órbita dentro del acelerador que por tal motivo recibe el nombre de sincrociclotrón.

3. El campo magnético $\vec{H}$

Como vimos anteriormente el campo magnético $\vec{H}$ es el responsable de la forma que adquieren las trayectorias de las partículas aceleradas. En el caso del sincrociclotrón de Buenos Aires este campo está constituido por un electroimán cuyas piezas polares tienen 180 cm de diámetro y cuyo entrehierro o espacio de aceleración tiene 35 cm de altura alcanzando su peso total a 187 toneladas de hierro y unas 9 toneladas de aluminio para sus bobinas de excitación. El campo $\vec{H}$ en el centro del electroimán llega a unos 14.000 Gauss

* Nótese que se trata aquí de un péndulo físico cuyo período aumenta con el momento de inercia de la masa en movimiento.

consumiendo una potencia de 220 KW. Debido al calor generado en las bobinas de excitación éstas están constituidas por un caño hueco por el cual circula agua destilada a presión que permite extraer el calor para ser absorbido en un circuito de intercambio térmico exterior.

Las piezas polares del electroimán son planas con suplementos correctores de hierro en la región periférica que permiten mantener un gradiente radial de campo magnético apropiado para la correcta trayectoria de las partículas aceleradas. El radio final de aceleración es 76 cm aprovechándose así el 84.5 % del total del imán. El campo magnético para este radio, de 14063 Gauss produce así en la mayor parte de la región útil de aceleración una pendiente del campo de aproximadamente 2,2 %. Existe un sistema de estabilización de corriente de excitación del electroimán que permite mantener el campo $\vec{H}$ constante con un error de $\pm 1:15.000$.

4. Inyección de iones:

Como se ha explicado, para que una partícula pueda ser acelerada es necesario que posea una carga eléctrica, o bien que esté ligada a otra partícula que posea dicha carga que podrá ser positiva o negativa indistintamente. A los efectos de la aceleración la partícula igualmente puede adquirir altas energías en cualquiera de los dos casos. El sincrociclotrón está diseñado para acelerar partículas cargadas de modo que los átomos neutros de deuterio deberán perder su único electrón para así presentar la carga positiva de su núcleo formado por un protón y un neutrón ligados entre sí con una energía de 2.2 MeV. Para comenzar el ciclo de aceleración es pues necesario inyectar estos iones en el centro geométrico del sincrociclotrón. Esto se realiza de la siguiente manera. Por medio de un conducto radial se inyecta deuterio a una cápsula colocada en el centro del electroimán en cuyo interior existe un filamento de tungsteno ca-

lentado al rojo y que por lo tanto emite electrones que ionizan el deuterio inyectado. Estos iones se forman en una atmósfera cuya presión es 0.1 a 0.5 torr.* y son extraídos a través de una tobera de unos 3 a 4 mm de diámetro y 30 a 40 mm de largo hacia el recinto de aceleración en el que se ha establecido el campo eléctrico $\vec{E}$ y que se encuentra a una presión de aproximadamente 10^{-5} torr.

5. El campo eléctrico $\vec{E}$

Como vimos anteriormente el campo eléctrico $\vec{E}$ es el responsable de la aceleración de los iones producidos. Está materializado entre dos cavidades cuya forma es como una letra de imprenta D y por tal motivo reciben ese nombre. Como dijimos este campo eléctrico es alterno de frecuencia tal que esté en sincronismo con el movimiento orbital de las partículas aceleradas. Además tal como se mencionó anteriormente esta frecuencia es variable ya que también es variable el período de revolución orbital de las partículas manteniéndose así el sincronismo en forma permanente a lo largo de todo el período de aceleración.

Los electrodos en forma de D son parte constitutiva de una línea oscilante de radiofrecuencia cuyo intervalo de frecuencias cubre la banda 11 MHz a 10.45 MHz. La modulación de frecuencia se logra por variación mecánica de la capacidad acoplada a un extremo de la línea de media longitud de onda en otro de cuyos extremos están las D y por tanto allí está localizado el campo eléctrico acelerador $\vec{E}$ que captura los iones salientes de la fuente de iones y comienza a acelerarlos.

Cabe recalcar aquí que debido al funcionamiento continuo de la fuente de iones éstos son permanentemente capturados por el campo $\vec{E}$ cualquiera sea la frecuencia del mismo. Sin embargo y debi-

* 1 torr. = 1 mm de Hg.

do al proceso del necesario sincronismo entre la frecuencia del campo E y la frecuencia de revolución orbital de los iones resulta que de todos los iones capturados solamente unos pocos serán acelerados hasta adquirir la energía final de diseño del acelerador. Estos pocos iones son aquellos que fueron captados por el campo eléctrico $\vec{E}$ en el preciso instante en que su frecuencia correspondía a 11 MHz es decir la frecuencia de revolución orbital de los iones en el centro de la máquina.

Estos iones, a medida que son acelerados comienzan a ganar energía y por tanto su masa también aumenta resultando que su frecuencia de revolución orbital disminuye. Puesto que la frecuencia del campo eléctrico $\vec{E}$ también disminuye debido a la variación de capacidad de la línea resonante resulta que existe sincronismo entre ambas frecuencias a lo largo de todo el ciclo de aceleración pudiendo así obtenerse un grupo de iones acelerados hasta la energía máxima de diseño del acelerador. Esto explica que el haz acelerado esté pues formado por pulsos es decir que la corriente acelerada no es continua sino pulsante. La corriente media acelerada de deuterones es, en condiciones normales, de aproximadamente 15 a 20 μA .

6. El sistema de vacío

La cámara de aceleración está constituida por las piezas polares del electroimán y una caja de paredes laterales como cierre de vacío que encierran un volumen aproximado de 2 m³.

Una línea de bombeo constituida por una bomba difusora, y una bomba mecánica produce en dicha cámara un vacío final de 10⁻⁵ torr. con una velocidad efectiva de bombeo de 2200 l/seg.

Es obvio recalcar que el éxito del proceso de aceleración depende del vacío en la cámara de aceleración ya que la presencia

del campo eléctrico $\vec{E}$ producido entre las D puede inducir descargas a tierra si aumenta la presión del gas residual. La tensión entre D es aproximadamente 20 KV. Por otra parte si el haz acelerado encuentra en la cámara una cantidad apreciable de moléculas del gas residual comienza a interactuar con las mismas produciendo ionización parásita que dispersa el haz acelerado y carga en forma espúrea el sistema de radiofrecuencia.

Una línea adicional de vacío mantiene una presión de 10^{-5} torr. dentro de un tanque en el cual está colocado un condensador variable formado por un disco rotante provisto de paletas frente a otro similar fijo. Cuando las paletas de ambos discos se enfrentan el sistema tiene máxima capacidad eléctrica.

Este condensador variable está acoplado al extremo de la línea de radiofrecuencia posibilitando en esta forma la modulación de frecuencia del campo eléctrico $\vec{E}$.

Un apropiado sistema de trampas frías permite limpiar en forma permanente el volumen evacuado de vapores condensables. El sistema de vacío permite llegar a la presión de trabajo partiendo de presión atmosférica en aproximadamente 4 horas de evacuación.

7. El sistema de extracción del haz

Para el estudio de ciertas reacciones nucleares es imprescindible medir la cantidad de radiaciones secundarias que resulta del bombardeo de un blanco por el haz de partículas acelerado. Esto sólo puede realizarse si se dispone del haz exteriormente a la cámara de aceleración, conducido a través de una tubería al vacío hacia una cámara también al vacío en cuyo centro se halla el blanco a ser estudiado que puede estar formado por una delgada lámina metálica o bien por una cámara gaseosa. Al incidir el haz

acelerado sobre el blanco se producen reacciones nucleares que a su vez producen la emisión de partículas nucleares en todas direcciones; del estudio de éstas puede inferirse propiedades nucleares que permiten comprender la estructura del núcleo blanco. Resulta por lo tanto de gran interés disponer de un sistema extractor de las partículas aceleradas cuyo funcionamiento sea lo suficientemente eficaz como para obtener fuera del acelerador un haz cuya intensidad sea apropiada a los fines de la investigación.

En el sincrociclotrón de Buenos Aires el sistema extractor está formado por un conjunto de campos magnéticos localizados cuya función es la de perturbar las órbitas normales de las partículas induciendo entre dos órbitas sucesivas un intervalo radial suficiente como para que las partículas puedan penetrar dentro de un canal magnético que pueda conducir las hacia el exterior del acelerador.

De esta forma pasan al interior de una tubería que está provista de un sistema óptico de enfoque magnético capaz de afinar el perfil del haz enfocándolo sobre el blanco de reacción.

APENDICECaracterísticas Generales del Equipo

Si se desea proyectar un sincrociclotrón que acelere deuterones hasta que alcancen una energía final de 30 MeV los elementos que esencialmente deben considerarse son: el campo magnético y la modulación de frecuencia del campo eléctrico.

En primer término observemos que la masa en reposo de un deuteron equivale a 1875.4 MeV; si éste es acelerado hasta alcanzar una energía cinética de 30 MeV su incremento de masa es de 1,6 % de la masa en reposo.

Si ahora consideramos el movimiento de una partícula de masa m y carga e , que se mueve con la velocidad $\vec{v}$ en un campo magnético $\vec{H}$ normal a su trayectoria, la condición de equilibrio dinámico está dada por:

$$\frac{m v^2}{r} = evH \quad (1)$$

donde r es el radio de curvatura de la trayectoria.

De la (1) resulta:

$$\frac{v}{r} = \omega = \frac{e}{m} H \quad (2)$$

donde ω es la velocidad angular de la partícula relacionada con la frecuencia de revolución de la misma por:

$$\omega = 2 \pi \nu \quad (3)$$

Cuando una partícula es pues acelerada en el sincrociclotrón su frecuencia de revolución varía según una ley que depende del campo magnético del imán y del factor

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}} \quad \beta = v/c \quad (4)$$

que dá cuenta de la variación relativista de su masa.

Se dice que una partícula es sincrónica cuando en cada instante su frecuencia de revolución es igual a la frecuencia del campo eléctrico que la acelera.

Supongamos para fijar ideas que $\vec{H}$ sea completamente homogéneo en todo el volumen de aceleración e igual a 14 kG.

Por las (2) y (3) resulta:

$$\nu = 10,6 \text{ Mc/seg} \quad (5)$$

Este dato fija la frecuencia que aproximadamente debe tener el campo eléctrico para acelerar deuterones hasta llevarlos a una energía cinética de 30 MeV.

Pero hemos supuesto que $\vec{H}$ es estrictamente uniforme, lo cual no ocurre en la realidad. Supongamos en cambio que $\vec{H}$ es una función decreciente del radio del imán y que su variación relativa es aproximadamente 2 % dentro del 85 % del radio máximo del imán. Por lo tanto cuando un deuterón es acelerado en este campo su frecuencia de revolución disminuye a medida que gana en energía cinética de modo tal que su máxima variación de frecuencia está dada por:

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta H}{H_1} = 3,6 \% \quad (6)$$

Esto equivale a imponer ya un porcentaje de modulación a la frecuencia del campo eléctrico a utilizarse para construir el sin crociclotrón. Un análisis similar para acelerar partículas α arroja naturalmente las mismas conclusiones.

En nuestro equipo es realmente

$$\frac{\Delta H}{H} = 2,2 \% ; (H)_r = 14408 \text{ Gauss}$$

$\frac{\Delta m}{m} = 1,6 \%$ y se ha construido un modulador que produce

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = 4 \%$$

La modulación se realiza por variación capacitiva lográndose un pulso de partículas aceleradas cada $500 \mu s$ con lo cual puede lograrse corrientes de blanco de 15 a $20 \mu A$ medidas con un blanco aislado y un microamperímetro.

La refrigeración del blanco se realiza mediante agua corriente con un caudal adecuado para disipar 1 kW.